Ueber sublakustre Rinnsale.

Inaugural-Dissertation

der

philosophischen Fakultät Sektion II

der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt am

18. Januar 1903

von

Paul Lücke

aus Strassburg i. E.

München
Dr. H. Lüneburg Verlag.
1903.

Ueber sublakustre Rinnsale.

Inaugural-Dissertation

der

philosophischen Fakultät Sektion II

der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt am

18. Januar 1903

von

Paul Lücke

aus Strassburg i. E.

München
Dr. H. Lüneburg Verlag.
1903.

Inhalts-Uebersicht.

Einleitung: Submarine und sublakustre Thäler und deren Verbreitung.
Allgemeiner Teil:
A. Gestalt und Dimensionen der sublakustren Thäler.
1. Das Thal im Bodensee.
2. Das Thal im Genfersee.
3. Die Rinnen im Gurtschensee.
B. Entstehung der sublakustren Thäler.
I. Unabhängigkeit ihrer Entstehung vom tektonischen Bau der Erdrinde.
II. Entstehungsbedingungen. Temperatur und Dichte des zufliessenden Wassers.
III. Art der Entstehung.
1. Forel's Akkumulationstheorie.
2. Lienhardt's Erosionstheorie.
3. Terminantentheorie.
a) Erosionsvermögen des Unterstromes.
b) Akkumulationsvermögen des Unterstromes.
Schluss: Fehlen der Rinnsale in den übrigen Schweizer Seen.

Abbildungen.

Tafel Ia: Das sublakustre Thal im Bodensee.
„ Ib: Das sublakustre Thal im Genfersee.
„ II: Die sublakustren Rinnsale im Bodensee und Genfersee im Vergleich mit Hochgebirgs- und Mittelgebirgsbächen.
Karte I: Das Rinnsal im Bodensee.
„ II: Das Rinnsal im Genfersee.
„ III: Die Rinnen im Gurtschensee.
Figur I: Der Gurtschensee bei Andermatt.
„ II: Die südliche Rinne im Gurtschensee (2 Profile).
„ III: Profile durch das Rheinrinnsal.
„ IV: Profile durch das Rhonerinnsal.
„ V: Wildbäche bei Kandersteg.

Einleitung.

Submarine und sublakustre Thäler und deren Verbreitung.

An den Küsten von Norwegen und Nordamerika[1]), an den Mündungen des Adour[2]) und des Congo[3]), an der Riviera di Ponente[4]) und im Golfe von Benin[5]) finden wir die vielbesprochene Erscheinung der submarinen Thäler.

Scheinbar analoge Erscheinungen zeigten sich bei der hydrographischen Aufnahme des Bodensees und des Genfersees. Forel hat jedoch nachgewiesen[6]), dass die Entstehung dieser sublakustren Rinnsale anderen Ursachen zugeschrieben werden muss. Nimmt man für die submarinen Thäler heute fast allgemein an, dass es sich hier um Teile des Flussbettes der an diesen Stellen mündenden Flüsse handelt, welche durch positive Strandverschiebung unter den Meeresspiegel geraten sind, so schreibt Forel die Bildung der sublakustren Rinnsale der Thätigkeit des zuströmenden kalten und Detritus führenden Gletscherwassers zu. Ausser ihm hat sich Lienhardt[7]) kurz mit der Frage der sublakustren Rinnsale beschäftigt und eine Theorie gegeben. Näheres über das Rinnsal im Bodensee finden wir in der Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung[8]). Verfasser vorliegender Abhandlung entdeckte neuerdings ein ähnliches Vorkommen in einem kleinen Alpensee oberhalb Andermatt.

---

[1]) Davidson, Submarine Valleys on the Pacific Coast of the United States. B. C. A. Sc. II. p. 265.

[2]) Le Léman par F.-A. Forel, Monographie limnologique, Lausanne 1892. I. p. 381. Anmerkung.

[3]) Stassano, La foce del Congo, Rom 1886.

[4]) Issel, Sur l'existence de vallées submergées dans le Golfe de Gênes.

[5]) Wie Note 2.

[6]) F.-A. Forel, Le Léman. I. p. 63 ff. p. 381 ff.

[7]) Lienhardt, Über unterseeische Flussrinnen. J. G. G. in München. XIV. p. 21 ff. 1890.

[8]) Zeppelin, Die geograph. Verhältnisse des Bodensees. B. XXII. 1893.
Kellermann, Die Rheinregulierung zwischen Vorarlberg und der Schweiz und ihr voraussichtlicher Einfluss auf den Fortbestand der Bregenz-Lindauer Bucht. B. XXIV. 1895.

Allgemeiner Teil.

A. Gestalt und Dimensionen der sublakustren Rinnsale.

1. Das Thal im Bodensee (s. Karte I und Tafel Ia).

Bei Betrachtung der vom eidgen. topogr. Bureau herausgegebenen Karte (1 : 50 000) fällt die eigentümliche Gestaltung der Isobathen vor der Mündung des Rheins auf. Während dieselben im allgemeinen den Konturen des Ufers folgen, treten sie hier eng zusammen und zeigen eigenartige Krümmungen, deren konvexe Seiten gegen das Ufer gerichtet sind. Es liegt hier eine thalartige Vertiefung vor. Zunächst verläuft das Rinnsal in nördlicher Richtung auf Langenargen am bairischen Ufer des Sees zu, um dann auf der Querlinie: Argonmündung-Horn nach Nordwest umzubiegen. Die Länge des Rinnsales beträgt 11.75 km. Seine Tiefe ist am bedeutendsten nahe der Mündung des Rheins, wo die Sohle etwa 70 m unterhalb der Böschungskante der Seitendämme liegt (vgl. Tafel Ia). Mit der Entfernung nimmt sie ab und beträgt bei 205 m Seetiefe nurmehr 10 m. Die Breite des Thales steht zur Tiefe im umgekehrten Verhältnis. Sie variirt zwischen 200 und 800 Meter. Das Gefälle des Rinnsales hat nach Zeppelin durchschnittlich 2,4 Proz., anfangs bis auf 1.25 km Entfernung von der Mündung 6,5 Proz.

Eine eigentümliche Erscheinung, welche aus dem Längsprofil Tafel Ia ersichtlich wird, schildert Zeppelin[9]) wie folgt: „An der Umbiegung am Fusse des Argenschwebs hat seine (des Rheins) augenscheinlich selbst hier noch ziemlich kräftige Strömung mittelst des wahrscheinlich durch den Anprall an die der bisherigen Richtung entgegenstehende Tiefhalde entstandenen Wirbels einen kleinen Trichter ausgehöhlt, in welchem die Sohle des Rinnsales bis 197.9 m sinkt, um erst 350 m weiter abwärts in 188.4 m Tiefe dessen unteren Rand zu erreichen und dann wieder gleichmässig weiter zu fallen.“ Bemerkenswert ist ferner, dass die innere Neigung der Seitendämme ziemlich steil gegen die Sohle abfällt, während die äussere Böschung sich allmählich verflacht. Die Sohle des Rinnsales liegt im allgemeinen tiefer als das Niveau des Dejektionskegels. Gegen Ende des Rinnsales wird auch die äussere Böschung steiler und schliesslich verschwinden die Dämme ganz;

[9]) Zeppelin, Die geogr. Verhältnisse des Bodensees, Zeitschr. d. V. f. Geschichte d. Bodensees und seiner Umgebung. B. XXII. 1893. S. 81.

der Graben ist kanalartig in den Seeboden eingeschnitten. Neben dem Hauptrinnsal zeigen sich noch andere Rinnen. Zu beiden Seiten der heutigen Mündung liegt je eine kleinere Längsvertiefung, von denen die eine in der Rorschacher Bucht vor Altenrhein gelegene die unterseeische Fortsetzung eines früheren Rheinbettes darstellt, wie dies schon der Name des Ortes andeutet. Heute ist dieses Rinnsal durch den Absatz des Deltas der heutigen Rheinmündung wohl teilweise verschüttet worden. Die Länge desselben beträgt nur etwa den vierten Teil des Hauptrinnsales und dementsprechend sind auch Breite und Tiefe geringer. Eine andere Vertiefung befindet sich östlich von der heutigen Mündung im sogenannten „Wetterwinkel". Sie bildet die Fortsetzung des auf der Karte verzeichneten Rinnsales."

2. Das Rinnsal im Genfersee (s. Karte II und Tafel 1b).

Die analoge Erscheinung zeigt sich im Genfersee. Die Länge des Rinnsales misst nur 10.25 km. Seine Breite variirt zwischen 500 und 800 Meter. Seine Tiefe beträgt auf 800 Meter Entfernung von der Mündung der Rhone 50 m, jenseits St. Gingolphe bei 230 m Seetiefe nur 10 m. Bei der Isobathe von 253 m erreicht das Rinnsal sein Ende. Die Sohle desselben liegt zumeist im Niveau des Dejektionskegels. Wie im Bodensee so ist auch hier die Innenböschung der Dämme stärker geneigt. Das Rinnsal verläuft mehrfach gewunden. Im allgemeinen hält es sich zunächst parallel dem Südufer des Sees; von Le Locon ab entfernt es sich in der Richtung auf Lausanne. Eine Eigentümlichkeit der Bildung im Genfersee[10]) ist das Auftreten kegelförmiger Erhebungen auf den Seitendämmen (vgl. Tafel 1b, a, b, c). Der bedeutendste dieser Kegel liegt 1250 m von der Mündung entfernt in 75 m Tiefe auf dem rechten Damm. Sein Durchmesser an der Basis beträgt 200 m, seine Höhe über der Böschungskante 20 m. Wie im Bodensee, so findet sich auch hier eine zweite Rinne östlich von der heutigen Mündung vor einem früheren Bett der Rone, welches heute noch den Namen „Vieux Rhône" führt.

3. Die Rinnen im Gurtschensee (s. Karte III und Fig. 1).

Steigt man an den Gehängen südlich von Andermatt am St. Gotthardt hinauf, so erreicht man einen Thalkessel, in welchen der Gurtschengletscher seine Schmelzwasser hinabsendet. An der rechten Thalflanke liegt in etwa 2250 m Höhe ein kleiner See, welcher im Siegfriedatlas, Blatt 398 verzeichnet ist. Der hier ebenfalls angeführte nördliche See existiert heute nur noch als kleiner Tümpel. Als ich zum ersten Male im Jahre 1901 dorthin kam, bemerkte ich am Seeboden eine Rinne, welche sich von der Mündung eines kleinen Baches bis zum Ausfluss desselben hinzog. Der Bach entsprang aus einem Lawinenrest etwa 50 m oberhalb der Mündung. Im August 1903 begab ich mich zum Zweck einer genaueren Kartenaufnahme abermals dorthin, fand aber die Verhältnisse verändert. Ein grosser Teil des Sees

[10]) Forel, Le Léman. B. I. p. 65.

wurde noch von einer teilweise bis 3 Meter mächtigen Lawine bedeckt, die in ihren unteren Teilen vereist war. Die beigefügte Karte ist auf Grund von Messungen ausgeführt, welche ich im August 1903 daselbst gemacht habe. Eine Basis von 15 m Länge wurde am Südufer des Sees gemessen und von hier aus die Lage von 28 Punkten des Seeufers und des Lawinenrandes vermittelst des Richthofen'schen Diopterkompasses mehrfach bestimmt. Der von der Lawine bedeckte Teil des Ufers müsste teils nach der beigefügten Photographie, teils mutmasslich ergänzt werden. Auf die Lage des schon im Jahre 1901 beobachteten Zusammenflusses (a) schloss ich aus einer Einsenkung der Lawine an dieser Stelle. In der östlichen Ecke mündet ein zweiter Zufluss (c), welcher von einem weiter oben am Gehänge gelegenen Schneefleck herabkam. Vor der Einmündung desselben war die Lawine zu einer tiefen Einbuchtung (d) abgeschmolzen. Der Umstand, dass die Lawinendecke über dem See an einigen Stellen noch fest war, gab mir Gelegenheit einige Tiefenmessungen am Lawinenrand vorzunehmen und das Vorhandensein einer Rinne festzustellen. Die Tiefen (s. Fig. II) am Lawinenrand gemessen, betrugen:

Mitte der Rinne:	0.39 m,
Linke Seite	0.12 „
Rechte Seite	0.16 „

Unter der Lawine, 1.50 m vom Lawinenrand entfernt, fanden sich folgende Tiefen:

Mitte der Rinne:	0.45 m,
Linke Seite	0.12 „
Rechte Seite	0.13 „

In den See hinaus verflacht sich die Rinne und biegt gegen den Ausfluss hin um. Die Breite der Rinne am Lawinenrand gemessen betrug 2 m. In der Einbuchtung (d) beträgt die Tiefe noch 1.50 m. Von einem höher gelegenen Punkte erblickte ich nun ausser dieser bereits 1901 beobachteten Rinne eine zweite (f), welche, weiter nördlich gelegen, in der Mitte des Sees in den südlichen Graben einlief. Die genaue Lage und die Tiefenverhältnisse derselben festzustellen gelang mir nicht wegen der Abschüssigkeit und Unsicherheit der Lawine an dieser Stelle. Die einzige ausführbare Messung ergab 1.90 m.

B. Entstehung der Rinnsale.

1. Unabhängigkeit der Entstehung vom tektonischen Bau der Erdrinde.

Man hat für die Entstehung der sublakustren Rinnsale die gleiche Ursache wie für die submarinen Thäler, d. h. positive Strandverschiebung angenommen. Andererseits glaubte man es mit Erdspalten zu thun zu haben[11]), die heute unter der Alluvionsdecke noch sichtbar seien. Beide Annahmen hat Forel widerlegt[12]). Bei der gewaltigen Akkumulation der

[11]) Duparc, Archives de la société de physique de Genèves. XXVII. 350.
[12]) F.-A. Forel, Le Léman. p. 382 ff.

Gletscherflüsse müssten die Details der ursprünglichen Bodengestalt längst verwischt sein. Auch der Umstand, dass die grösste Tiefe der Rinnsale nahe der Mündung gelegen sei, hier aber auch die stärkste Materialablagerung stattfände, spreche dagegen; denn die Annahme einer früheren Spalte oder eines früheren Flussbettes müsste gerade da die Ausfüllung verlangen, wo die Akkumulation die stärkste sei. Die Übereinstimmung der beiden bis jetzt bekannten Rinnsale weise auf eine noch heute vor sich gehende analoge Thätigkeit hin. Endlich spreche auch die Ähnlichkeit in der Lage der Rinnsale an der heutigen oder an früheren Mündungen der Flüsse für direkte Thätigkeit des zuströmenden Flusswassers. — Was die Bildung des Gurtschensees betrifft, so liesse sich mit grösserem Rechte annehmen, dass derselbe durch Abdämmung entstanden sei und die Rinnen am Boden desselben das frühere Bachbett darstellten. Da jedoch, was dann notwendigerweise der Fall sein müsste, die Rinnen mit der grössten Tiefe des Sees nicht zusammenfallen und derselbe thalwärts durch anstehendes Gestein abgeschlossen wird, so müssen wir auch hier die Erscheinung mit der direkten Wirkung des zuströmenden Wassers in Zusammenhang bringen. Die Bildung des Sees dürfte auf Gletschererosion zurückzuführen sein, worauf schön ausgebildete Rundhöcker in nächster Nähe hinweisen.

2. Entstehungsbedingungen, Temperatur und Dichte des zufliessenden Wassers.

Wir haben soeben gesehen, dass die sublakustren Rinnsale ihre Bildung dem zufliessenden Wasser verdanken. Wie kann dies geschehen? Soll Flusswasser, welches sich in einen See ergiesst, eine bodengestaltende Wirkung ausüben, so muss es nach seinem Eintritt in den See zu Boden sinken können. Dass dies thatsächlich der Fall ist, beweist uns das Phänomen der „Bataillèren". Das schmutziggelbe Wasser der Zuflüsse, das mit bedeutender Geschwindigkeit im See anlangt, breitet sich auf 100—200 Meter vor der Mündung horizontal aus und verschwindet dann plötzlich in einem Wasserfall in der Tiefe. Die Bedingung, welche diesen Wassersturz verursacht, kann nur diejenige sein, dass das Wasser der Zuflüsse eine grössere Dichte und damit grösseres spezifisches Gewicht besitzt als das Wasser des Sees. Ich betrachte zunächst die Verhältnisse in der Rhone und dem Genfersee, welche durch Forel genauer dargelegt worden sind. — Die Dichte des Flusswassers wird durch seine Temperatur, sowie durch seinen Gehalt an ungelöstem und hauptsächlich an gelöstem Material bedingt. Die Dichte des Seewassers hingegen hängt, da sich das Schwemmmaterial bald zu Boden setzt, vorwiegend von der Temperatur, in geringem Maasse vielleicht auch von äolischem Staub ab. Da die Insolation auf die Oberfläche eines Sees kräftiger wirkt als auf einen Fluss, in welchem eine fortwährende Vermischung der Wasserteilchen stattfindet, so wird die Temperatur der oberen Schichten des Sees schon daher eine höhere, die Dichte des Wassers geringer. Bei Gletscherflüssen ist die Temperatur im allgemeinen schon geringer, ihre Schlammführung sehr gross und die Dichte

infolgedessen bedeutender. Dies geht aus der folgenden Tabelle hervor, welche Forels „Lac Léman“ [13]) auszugsweise entnommen ist:

Genfersee		Rhone	
Temperatur	Dichte	Temperatur	Dichte
0°	1.00 008	0°	1.000 053
1°	1.00 013		
2°	1.00 017	1.7°	1.000 164
3°	1.00 019	2.7°	1.000 167
4°	1.00 020	4.2°	1.000 169
5°	1.00 019		
6°	1.00 017		
7°	1.00 014	7.2°	1.000 259
8°	1.00 010	7.7°	1.000 674
9°	1.00 005		
10°	0.99 998	9.7°	1.000 865
		9.7°	1.000 148
		9.7°	1.000 477
		10.2°	1.000 093
		10.2°	0.999 993
		10.7°	1.001 245
		11.5°	1.000 285
12°	0.09 977	12.2°	1.000 451
		12.7°	1.000 790
14°	0.99 952		
16°	0.99 932		
18°	0.99 889		
20°	0.99 850		
22°	0.99 807		
24°	0.99 760		

Wir ersehen daraus, dass das Seewasser nahezu dem Dichtengesetz des destillierten Wassers folgt, d. h. dass es bei 4° C. seine grösste Dichte erreicht. Anders bei dem Wasser der Rhone, wo der Schlammgehalt eine bedeutende Abweichung bewirkt. Es zeigt sich hier, dass bei gleichen Temperaturen je nach der Grösse der Schlammführung die Dichte sehr verschieden sein kann. Im allgemeinen aber fällt das Maximum der Dichte auf höhere Temperaturen.

Es folgt ferner aus dieser Tabelle:

I. Mittlere Dichte des Seewassers = 0.999 100
Mittlere Dichte des Rhonewassers = 1.000 387

II. Maximaldichte des Seewassers = 1.000 200
Maximaldichte des Rhonewassers = 1.001 245

[13]) Forel, Le Léman. I. p. 373.

III. Minimaldichte des Seewassers = 0.997 600
Minimaldichte des Rhonewassers = 0.999 993.

Die Dichte des Rhonewassers überwiegt in jedem dieser drei Fälle. Nehme ich endlich die Extreme:

IV. Maximaldichte des Seewassers = 1.000 200
Minimaldichte des Rhonewassers = 0.999 993

so beträgt selbst in diesem Fall der Überschuss des Seewassers an Dichte nur 0.000 207.

Wenn auch diese Tabellen einen Anspruch auf grosse Genauigkeit nicht machen können, so ersieht man immerhin daraus, dass das Wasser der Rhone fast immer eine grössere Dichte hat und somit befähigt ist, der Neigung des Dejektionskegels zu folgen.

Die Temperatur- und Dichtebestimmungen in Rhein und Bodensee sind sehr vereinzelt. Forel gibt an, dass auf 1 Liter Wasser des Rheins an seiner Mündung 1—2 gr gelöstes und ungelöstes Material kommen[14]). An anderer Stelle[15]) finden wir, dass bei Entnahme von Wasserproben 0.5 km stromaufwärts das Wasser 0.035 93 gr im Liter an suspendierten Körpern enthielt, 1 km seewärts von der Mündung: 0.0111 gr im Liter. Der Verdampfungsrückstand ergab für die erste Probe 0.1864 gr auf den Liter, für die zweite 0.1606. Hieraus geht hervor, dass der Gehalt an gelösten Stoffen ein recht bedeutender ist. Endlich hat Kellermann[16]) zwei Dichtebestimmungen gemacht, die eine im Rhein bei St. Margarethen am 18. Februar bei 9° C. Wassertemperatur ergab eine Dichte von 1.000 228, die zweite am 6. April 1.000 208. Die Temperaturen in See und Zufluss gibt Forel in folgender Tabelle:

Temperaturmittel für die 4 Jahreszeiten in Rhein und Bodensee.

		Rhein	Bodensee	Differenz
Winter	Dez.-Febr.	1.9°	3.9°	— 2.0°
Frühling	März-Mai	7.4°	6.7°	+ 0.7°
Sommer	Juni-Aug.	11.9°	17.8°	— 5.9°
Herbst	Sept.-Nov.	7.9°	11.9°	— 4.0°

Im Winter allein, wo der Rhein nur sehr geringe Mengen an Schwemmmaterial führt, sodass sein Wasser klar und durchsichtig erscheint, müsste das Wasser des Rheins dem gewöhnlichen Dichtegesetz folgen, d. h. seine Temperatur bei 4° C. haben, und man daher aus den Temperaturen

[14]) Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung. 1893. Die Temperaturverhältnisse des Bodensees von F. A. Forel. p. 39.

[15]) Ebenda. 1894. Untersuchung von Wassern und Grundproben aus dem Bodensee. p. 7.

[16]) Ebenda. 1895. p. 57.

[17]) Ebenda. Die Temperaturverhältnisse des Bodensees von F. A. Forel. p. 29.

schliessen, dass zu dieser Zeit die Dichte des zufliessenden Wassers geringer sei als diejenige des Seewasser. Nun führen aber gerade im Winter die Gletcherflüsse den grössten Gehalt an gelöstem Material und es lässt sich aus diesem Umstand schliessen, dass das ganze Jahr hindurch das zufliessende Wasser befähigt ist, unter den Seespiegel zu sinken.

3. Entstehung der Rinnsale.

I. Forel's Akkumulationstheorie.

Forel äussert seine Ansicht über die Entstehung der sublakustren Rinnsale in nachstehender Theorie:

„Die unterseeischen Rinnsale der Gletscherflüsse werden bedingt durch die Verlängerung des Flusslaufes in dem Seebecken. Diese Strömung resultiert aus der grösseren Dichte der kalten und mit Schwemmmaterial beladenen Flüsse, welche sich unter das weniger dichte Wasser des Sees senken. Auf beiden Seiten dieser Strömung veranlassen die Wirbel das Abladen des Materials und die Bildung der Seitendämme." Wie hieraus ersichtlich, hält Forel Erosionsfähigkeit des Unterstromes für ausgeschlossen. Er nahm früher an[18]), dass der Unterstrom, da er sich nach seiner Ansicht im Winter und im Frühjahr infolge der grösseren Dichte der Zuflüsse in diesen Jahreszeiten bis zu 200 m Tiefe verlängern kann, die Alluvionsdecke, welche sich im vorhergehenden Sommer und Herbst gebildet hat, wo infolge geringerer Dichte das Wasser nicht bis zu dieser Tiefe Bewegung zeigen soll, wegzuschwemmen vermag. Er schrieb somit dem Unterstrom beschränkte Erosionsfähigkeit zu. Heute scheint er von dieser Ansicht abgekommen zu sein. Wenigstens geht dies aus seinen Worten hervor: „Est-ce un phénomène d'érosion? Ce courant creuse-t-il la vase molle du cône d'alluvion, et s' y fraie-t-il un chenel? Cela n'est guère probable. Son pouvoir d'affouillement doit être faible, et dans le Lac Léman du moins, le fond de la rigole est à peu près au niveau général du cône souslacustre. Je crois plutôt à un fait d'alluvion." [19])

Nimmt nun Forel gerade letzteren Umstand als Beweis für seine Theorie, so gibt er an anderer Stelle[20]) zu, dass im Bodensee die Sohle des Rinnsales unter dem Niveau des Schwemmkegels liegt. Dieser Unterschied in der Gestaltung der beiden Rinnsale lässt sich aber, wie wir später sehen werden, durch Akkumulation schwer erklären. Im Genfersee wie im Bodensee ist ferner die Innenböschung der Seitendämme stärker geneigt. Nach allgemeinem Gesetz müssten sich aber die niedersinkenden Teilchen nach beiden Seiten hin in gleichen Winkeln anordnen, wenn nicht der Unterstrom stark genug wäre, durch Fortschwemmung der abgeladenen Teilchen die Neigung an der Innenseite zu vergrössern oder doch den Absatz derselben zu verhindern. Schon in Anbetracht, dass das Wasser

[18]) Forel, Le ravin sous-lacustre du Rhône. Bull. S. V. S. N. XXII. p. 85. Lausanne 1887.

[19]) Forel, Le Léman. B. I. p. 385.

[20]) Ebenda. p. 65.

noch in grosser Entfernung von der Mündung Bewegung zeigt, muss man dem Unterstrom wenigstens nahe der Mündung Erosionsfähigkeit zuschreiben.

II. Lienhardt's Erosionstheorie.

In der bereits in der Einleitung erwähnten Abhandlung über submarine Thäler schreibt Lienhardt die Bildung der sublakustren Rinnsale der Erosion des am Grunde dahinfliessenden Schlammstromes zu. Derselbe soll von zäher Beschaffenheit sein und an seiner Sohle Geröll eingeschlossen enthalten, welches, ähnlich, wie man für die Gletschererosion annimmt, wie eine Feile den Untergrund herausarbeitet. Abgesehen davon, dass Delebecque's dem Rhonerinnsal an mehreren Stellen entnommene Proben nur reinen Sand ergaben, dessen grösste Körner 1 mm im Durchmesser besassen, ist Lienhardt's Theorie schon deshalb kaum annehmbar, weil einerseits die Neigung der Sohle viel zu gering ist, als dass man der Schwerkraft allein die Bewegung des Schlammstromes zuschreiben könnte, andererseits aber die lebendige Kraft des fliessenden Wassers kaum stark genug sein kann, um dies zu bewirken. Ich bin vielmehr der Ansicht, dass man die Erosion der direkten Wirkung des fliessenden Wassers in der Weise zuschreiben muss, dass dasselbe nur die feineren Schlammpartikelchen, welche zur Ablagerung kamen, als der Fluss noch eine andere Mündung besass, wiederaufzunehmen und weiterzuverfrachten im Stande ist. Es kann somit eine allmähliche Tieferlegung des Bettes stattfinden, welche jedoch durch den heutigen Schlammabsatz verzögert wird und somit nur eine sehr langsame ist.

III. Terminantentheorie.

Wir haben gesehen, dass keine der beiden Theorieen die Grabenbildungen genügend erklärt. Ein Vergleich der Rinnsale mit den Gefällskurven einiger Hochgebirgs- und Mittelgebirgsbäche (s. Tafel II) gestattet eine Vereinigung der beiden Ansichten. Ein geophysikalisches Gesetz besagt, dass jeder Fluss das Bestreben zeigt, eine Normalgefällskurve herzustellen und daher in den Teilen, in welchen die Neigung stärker ist, erodiert, bei abnehmender Neigung akkumuliert. Wir sehen aber, dass dieses Gesetz nicht auf grosse Ströme und Bäche beschränkt ist, sondern auch auf kürzeren Strecken seine Giltigkeit behält. Es muss daher auch anwendbar sein auf unterseeische, auf geneigtem Boden fliessende Strömungen. Wie aus dem Vorhandensein von Rinnsalen vor älteren Mündungen des Rheins und der Rhone hervorgeht, ist die Bildung von solchen an jeder Stelle des Dejektionskegels Regel, wohin auch der Fluss seine Mündung verlegt. Der Unterstrom wird stets das Bestreben haben, in dem durch ältere Mündungen gebildeten Delta neben lateraler Akkumulation eine Normalgefällskurve herzustellen und daher im Oberlauf, wo die Neigung stärker ist, erodieren, im Unterlauf, wo dieselbe geringer wird, neben dem in die Tiefe geführten Detritus das aus dem Dejektionskegel herausgearbeitete Material ablagern.

a) Erosionsvermögen des Unterstromes.

Die Frage, ob der Unterstrom die Kraft besitzt, Erosion auszuüben, ist endgiltig nicht zu beantworten, so lange nicht Geschwindigkeitsmessungen im Genfersee und Bodensee gemacht worden sind. Bis auf weiteres sind wir auf Vermutungen und Schlüsse angewiesen, welche wir aus den verschiedenen Verhältnissen der sublakustren Rinnen und deren Übereinstimmung mit uns bekannten Beispielen ähnlicher Art ziehen können. Man könnte zweifeln, ob eine stärkere unterseeische Strömung überhaupt möglich ist. Nun gibt uns aber die Erscheinung im Gurtschensee ein Analogon, das uns zu dieser Annahme berechtigt. An der Stelle am Lawinenrand, woselbst der südliche Graben liegt, ergaben Temperaturmessungen folgendes:

Temperaturen:	12 Uhr Mittags:	3^{45} Uhr Nachm.
In der Tiefe des Grabens:	+ 1.8° C.	— 1.5° C.
An der Oberfläche:	— 1.8° C.	+ 3.5° C.
Über der rechten Seite:	+ 9.7° C.	— 11.5° C.
Über der linken Seite:	— 9.8° C.	+ 11.4° C.

Innerhalb des Grabens fand, wie hieraus ersichtlich, eine Zufuhr kälteren Wassers statt, welche sich um 12 Uhr mittags noch in einer schwachen, seewärts gerichteten Bewegung äusserte. Um 12 Uhr 30 Min. trat eine auffallende Änderung ein. Die Strömung nahm eine fast entgegengesetzte Richtung an und hineingeworfene Korkstückchen verschwanden unter der Lawine. Diese Strömung nahm an Geschwindigkeit zu und war gegen 3 Uhr am stärksten. Da der Seespiegel an anderen Stellen in Ruhe, der See aber gegen den herrschenden Wind geschützt war, so kann man sie diesem nicht zu schreiben. Dies liess mich auf den Gedanken kommen, dass ein anderer stärkerer Strom eine saugende Wirkung auf das Wasser der Umgebung ausübte und, da sich ein solcher an keiner Stelle der Oberfläche zeigte, in der Tiefe zu suchen sei. Und in der That gelang es mir, denselben festzustellen. An der Stelle, wo der nördlich gelegene Graben zu vermuten ist, betrug die Temperatur an der Oberfläche + 10° C., in der Tiefe von 1.80 m nur + 4° C. An der Oberfläche breitet sich das + 11° C. betragende Wasser des östlichen Zuflusses aus und bewirkt hier die raschere Schmelzung der Lawine. In der Tiefe aber sammelt sich das schwere Schmelzwasser der Lawine in einem kalten Unterstrom. Die Geschwindigkeit desselben war so stark, dass es nicht möglich war, die Messstange in wagerechter Stellung zu halten, während sich an der Ober-

fläche kaum eine Bewegung zeigte. — Ein Strom von dieser Stärke muss aber im Stande sein, zu erodieren. Da der Boden des Sees ausserdem aus feinem Schlamm besteht, so muss man auch annehmen, dass diese Erosion sehr rasch vor sich gehen und in kürzester Zeit, nehmen wir 1—2 Jahre, einen Graben schaffen kann. Auch der Ausfluss des Sees hat eine Temperatur von 4° C., während das Thermometer an der Seeoberfläche fast durchweg + 10° bis + 11° C. zeigt. Dies lässt darauf schliessen, dass der Unterstrom den ganzen See durchfliesst, wie ja auch der Graben durch den ganzen See hindurchgeht. Inwiefern dies möglich sein kann, erklärt sich folgendermassen. Der Unterstrom besitzt vermöge seiner Geschwindigkeit kinetische Energie. Da der Seeboden gegen den Ausfluss hin wieder aufsteigt, so verwandelt sich diese, wenn der Unterstrom die tiefste Stelle erreicht hat, in potentielle Energie und der Unterstrom muss daher eine Strecke aufwärts steigen, wobei er durch den Druck des fortwährend nachdrängenden Wassers und durch die saugende Wirkung des Ausflusses unterstützt wird.

Wie erklären sich nun die starken Temperaturdifferenzen. Das Schmelzwasser der Lawine, dessen Temperatur + 0° C. beträgt, kann sich während seines kurzen Laufes bis zur Mündung, wie dies im Jahre 1901 der Fall war, oder bei direktem Abfluss in den See, nur wenig erwärmen. Seine Dichte, welche hier lediglich von der Temperatur abhängt, nimmt zu bis zu 4° C., so dass der Unterstrom die Maximaldichte besitzt. Die Temperatur des Seewassers steht unter anderen Verhältnissen. Unter Einwirkung der Sonnenstrahlung erwärmt es sich zwar langsamer als das umgebende Erdreich, gibt aber die aufgenommene Wärme auch langsamer an die Atmosphäre ab. Im Laufe des Sommers, zur Zeit der kürzeren Nächte wird daher das Wasser, unterstützt durch wärmere Zuflüsse, seine Temperatur erhöhen. Das wärmere und daher spezifisch leichtere Wasser sammelt sich an der Oberfläche, während das kalte Wasser in der Tiefe bleibt. Die Einwirkung der Isolation wird am deutlichsten ersichtlich aus den Temperaturverhältnissen im südlichen Graben (siehe Fig. II: die Profile). Ueber den Rändern, wo die Tiefe nur 12—16 cm beträgt, kann das Wasser durchweg erwärmt werden, nicht so über der Mitte des Grabens, wo die Zufuhr von kaltem Wasser die Wirkung der Insolation vernichtet.

Im Genfersee und im Bodensee sind jedoch die Verhältnisse nicht ganz die gleichen. Zwar ist die erste Bedingung erfüllt, dass Dichteunterschiede vorhanden sind. Auch ist das Material des Untergrundes ein lockeres, so dass der Erosion in dieser Beziehung kein Hindernis im Wege steht. Die grössere Tiefe der beiden Seen und der dadurch bedingte hydrostatische Druck müssen jedoch eine sehr starke Verzögerung der Bewegung hervorrufen, so dass es fraglich erscheint, ob Erosion stattfinden kann. Soll eine Strömung erodieren, so muss zunächst die Neigung des Untergrundes gross genug sein und zweitens muss die Geschwindigkeit des Unterstromes genügen, um Erosion zu ermöglichen. Zum Vergleich ziehe ich den Vorderrhein, die Unteralp bei Andermatt, die Realper und die Göschener Reuss

als Typus der Hochgebirgsbäche, die Raumünzach und deren Nebenfluss, den Schwarzenbach im nördlichen Schwarzwald als Typus der Mittelgebirgsbäche heran. Alle diese Bäche sind auf ihre ganze Länge hin in vollster Erosion begriffen. Die Neigung der Rinnsale im Genfersee und Bodensee entspricht wenigstens in den oberen Teilen derjenigen der Mittelgebirgsbäche. Es kann uns daher nicht unwahrscheinlich dünken, dass auch hier Erosion stattfinden kann. Ist aber auch die Geschwindigkeit des Unterstromes gross genug, um demselben Erosionsfähigkeit zu verleihen? Mehr noch als während des Thallaufes tritt unter dem Wasserspiegel die Reibung hindernd entgegen. Es wirken jedoch verschiedene Faktoren, welche den Unterstrom befähigen, in grössere Tiefen hinabzusinken. Wie wir oben gesehen haben, wachsen mit der Neigung seines Bettes Geschwindigkeit, Druckkraft und Erosionsvermögen eines Flusses. Tritt nun derselbe in einen See ein, so büsst er natürlich infolge vermehrter Reibung seine Geschwindigkeit ein. Ist er jedoch durch Temperatur und Materialgehalt befähigt, dem Zug der Schwere zu folgen, so erhält er ein grösseres Gefälle. Was er an Geschwindigkeit durch Reibung einbüsst, das ersetzt daher zum Teil die grössere Neigung seines Bettes. Dazu kommt, dass die stets nachdrängenden Wassermassen die Bewegung des Unterstromes fortwährend unterstützen. Ferner wird ein Teil der Kraft, welche der Fluss während seines Thallaufes dazu verwendet, Geröll an seiner Sohle zu verfrachten, frei, wenn dieses an der Mündung liegen bleibt und ebenfalls in Stand gesetzt, der Reibung entgegenzuwirken. Endlich kommt hinzu, dass die Dichte des Wassers hauptsächlich von seinem Gehalt an gelösten Stoffen herrührt, welche nur in geringerem Masse durch Vermittlung der Tierwelt des Sees zur Ausscheidung gelangt. Das Wasser wird erst in derjenigen Tiefe zu fliessen aufhören, in welcher auch das Seewasser infolge tieferer Temperaturen und vermehrten hydrostatischen Druckes eine grössere Dichte besitzt, so dass die Bedingung für den Unterstrom, der Dichteunterschied, nicht mehr besteht. Forel und Kellermann sind nun zwar der Ansicht, dass eine bedeutende Geschwindigkeit des Unterstromes nicht möglich ist. Nun erklärt aber Kellermann [21]) den Umstand, dass das Rinnsal im Bodensee auf der letzten Strecke ohne Dammbildung eingeschnitten ist, in der Weise, dass er dem Unterstrom nicht nur die Fähigkeit zuschreibt, Schwebematerial abwärts zu führen, sondern auch sein Geschiebe. Letzteres soll den Graben verursachen. Er nimmt vermutlich Erosion an nach Lienhardt's Theorie. Es ist jedoch kaum denkbar, in welcher Weise die Fortbewegung des Geschiebes in dieser Entfernung stattfinden soll, wenn man nicht auch hier noch einen sehr starken hydrodynamischen Druck für möglich hält, welcher das Geröll abwärts bewegt; denn die Neigung des Bettes in dieser Tiefe ist zu schwach, um eine Eigenbewegung des Gerölles zu ermöglichen. Es ist aber überhaupt kaum anzunehmen, dass die Geschwindigkeit des Unterstromes in seinem Ende noch so bedeutend ist und lässt sich die Erscheinung vielleicht besser in folgender Weise erklären: Tritt ein Fluss aus engerem

[21]) Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees. B. XXIV. p. 60.

Thal in eine Weitung ein, so zeigt er das Bestreben, selbst wenn die Neigung seines Thalweges nicht geringer wird, sein festes Material in Form eines Schuttkegels abzusetzen, weil er sich seitlich über eine grössere Fläche ausbreiten muss und dadurch eine vermehrte Reibung erleidet. Deutlich zeigen dies die Wildbäche bei Kandersteg (s. Fig. V). Derselbe Fall tritt ein bei den sublakustren Rinnsalen. Wie aus den Profilen (Fig. III u. IV) hervorgeht, nimmt die Breite der Rinnsale mit der Entfernung zu, die Neigung ab. Der Unterstrom hat also das Bestreben, sich mehr und mehr seitwärts auszubreiten und wird, wenn die laterale Akkumulation aufhört, sein Material in Gestalt eines Schlammkegels ablagern. In der Mitte ist aber immerhin die Geschwindigkeit noch am grössten und daher der Absatz an dieser Stelle geringer, so dass das Niveau der Grabensohle gegen die Umgebung zurückbleibt. Forel's und Kellermann's oben erwähnte Ansicht, dass der Unterstrom eine bedeutende Geschwindigkeit nicht besitzen kann, scheint daher nicht begründet, zumal wir sehen, dass der Sand, wie aus der Dammbildung und aus Delebecque's Proben hervorgeht, bis in weite Entfernung von der Mündung verfrachtet wird, was ohne Bewegung des Wassers nicht möglich ist. Delebecque[22]) schätzt die Geschwindigkeit des Unterstromes im Genfersee noch in der Entfernung von 7 km auf 0,20 m in der Sekunde. Es ist dies die Minimalgeschwindigkeit, welche Sand zu bewegen im Stande ist. In 7 km Entfernung von der Mündung liegt die Sohle des Rinnsales in ca. 230 m Tiefe; der hydrostatische Druck des Seewassers beträgt an dieser Stelle ungefähr 23 Atmosphären; die Reibung ist infolgedessen eine sehr bedeutende. Ist also hier noch eine für die Verhältnisse recht starke Bewegung vorhanden, so muss dieselbe nahe der Mündung sehr viel grösser sein. Die Rhone hat vor ihrer Mündung eine Geschwindigkeit, welche ihr gestattet, in der Sekunde 300—500 cbm Wasser in den See zu befördern[23]), und wir werden kaum fehlgehen mit der Annahme, dass die Geschwindigkeit des Unterstromes während der ersten Strecke, wo der hydrostatische Druck verhältnismässig gering, die Dichte des zuströmenden Wassers aber am grössten ist, wenig hiervon abweicht. Die Strömung muss daher stark genug sein, um zu erodieren

Es könnte dem widersprechen, dass Erosion in so langer Zeit einen viel tieferen Graben hätte herstellen müssen. Diese Annahme ist jedoch nicht berechtigt. Das Auftreten kleinerer Rinnsale vor älteren Mündungen gestattet die Annahme, dass Grabenbildung zu jeder Zeit und an jeder Stelle stattfinden kann, wohin auch der Fluss seine Mündung verlegt. Da die in den See transportierten Schlammmengen sehr bedeutend sind, so wird sich ein Teil derselben an der Sohle des Unterstromes, wo derselbe durch Reibung eine geringere Geschwindigkeit besitzt, absetzen. Da der Unterstrom daher auch dieses abgelagerte Material wieder aufnehmen muss, welches immer wieder ersetzt wird, so kann die Erosion nur sehr langsam von statten gehen.

---

[22]) Delebecque, Les Lacs français. Paris 1898. p. 69.

[23]) Forel, Lac Léman. p. 385.

Es spricht also nicht gegen Erosion, dass die Tiefe der Rinnsale im Verhältnis hierzu eine geringe ist, zumal die Mündung nicht stets an derselben Stelle gelegen hat; denn, wohin immer der Fluss seine Mündung verlegt, hat er das Bestreben die Normalgefällskurve herzustellen. Auch heute noch sind die Unterströme im Genfersee und Bodensee in diesem Bestreben begriffen, ihr Bett tiefer zu legen.

Man könnte ferner geltend machen, dass die Rinnsale im Genfersee und Bodensee erst in einiger Entfernung von der Mündung beginnen, was der Erosion widersprechen würde, denn in diesem Falle müsste sie gerade hier am augenscheinlichsten sein. Wir müssen aber bedenken, dass gerade an der Mündung das gröbere Material niedersinkt und somit ein Rinnsal nicht zu Stande kommen lässt. Ueberdies werden die Flüsse, welche sich mit bedeutender Geschwindigkeit in die Seen ergiessen, zunächst ihre horizontale Richtung beibehalten und daher auf den Dejektionskegel gar nicht oder nur wenig wirken können. Ein Einfluss auf den Untergrund ist erst da möglich, wo die „Bataillère" den Boden berührt.

Im Winter führen Rhein und Rhone keinen oder nur sehr wenig Schlamm, so dass ihr Wasser durchsichtig erscheint. Aus diesem Umstand könnte man schliessen, dass im Winter die Dichte der Zuflüsse geringer ist, so dass auch die Geschwindigkeit abnimmt und der Unterstrom seine Erosionskraft verliert. Dies ist jedoch nicht der Fall. Denn je geringer der Schlammgehalt, um so mehr hängt die Dichte des Wassers von der Temperatur ab. Hat es bei starker Schlammführung, wie wir früher gesehen haben, seine grösste Dichte bei ca. 10—12° C., so wird es bei geringem Schlammgehalt mehr dem destillierten Wasser entsprechen, d. h. bei 4° C. seine grösste Dichte erreichen. Nimmt also im Winter die Dichte der Zuflüsse ab, da die Schlammführung geringer wird, so nimmt sie andererseits zu, da auch die Temperatur sich dem Nullpunkte nähert. Zudem weist gerade der Gehalt an gelösten Stoffen, wie Delebecque für die Rhone nachgewiesen hat [24]), im Winter ein Maximum auf, so dass auch zu dieser Zeit der Unterstrom bestehen und genügend Geschwindigkeit besitzen muss, um zu erodieren. Seine Erosionskraft muss gerade zu dieser Jahreszeit am thätigsten sein, wo die Flüsse wenig Schlamm führen und somit der Absatz desselben an der Sohle des Unterstromes, wo die Reibung die Geschwindigkeit verringert, in Wegfall kommt. Im Winter kann die ganze Kraft des Unterstromes zur Tieferlegung des Bettes verwandt werden.

Die ganze Ausgestaltung der Rinnsale scheint für Erosion zu sprechen. Nach Forel liegt im Genfersee die Sohle des Rinnsales ungefähr im Niveau des Schwemmkegels. Delebecque gibt hingegen an [25]), dass die Sohle überall, wenn auch nur um ein geringes tiefer liegt, als die Umgebung, so dass, wenn man sich die Seitendämme fortgenommen denkt, das Rinnsal in den Kegel eingesenkt erscheint. Im Bodensee zeigt sowohl das Haupt-

[24]) Delebecque, Les Lacs français. Paris 1898. p. 226,
[25]) Ebenda, p. 67.

rinnsal wie auch der Graben vor Altenrhein, dass hier die Sohle der Rinnsale bedeutend unter dem Niveau des Schwemmkegels liegen. Dies kann aber nur möglich sein, wenn man entweder dem Unterstrom Erosionskraft zuschreibt oder wenigstens annimmt, dass ein Ablagern von Schlamm über der Sohle des Rinnsales in geringerem Masse stattfindet als über dem Dejektionskegel. Wie nun aber das Phänomen der „Bataillère" erkennen lässt, führt der Unterstrom das gesammte Schwemmmaterial innerhalb des Rinnsales in die Tiefe. Die scharfe Begrenzung zeigt sich schon an der Oberfläche, geht aber noch deutlicher nach Delebecque daraus hervor, dass innerhalb des Rinnsales im Genfersee nur Sand, zu beiden Seiten desselben über dem Schwemmkegel nur Schlamm gefunden wurde, wie er den Boden des Sees in der grössten Tiefe bedeckt. Hieraus ist zu erkennen, dass über dem Dejektionskegel der Absatz sehr gering ist. Nimmt man also innerhalb des Rinnsales Akkumulation an, so müssten die Verhältnisse gerade die umgekehrten sein; es müsste die Sohle des Rinnsales allmählich sich über das Niveau des Dejektionskegels erheben. Die Ausgestaltung des Rheinrinnsales ist daher jedenfalls der Erosion zuzuschreiben. Im Genfersee scheinen die Verhältnisse mehr als im Bodensee auf axiale Akkumulation hinzuweisen, da hier die Lage der Rinnsalsohle nur wenig tiefer liegt als der Dejektionskegel. Um Akkumulation gelten zu lassen, müsste man annehmen, dass die Bewegung des Rhoneunterstromes eine sehr geringe sei. Dem widerspricht aber, dass auch hier Dammbildung in grösseren Tiefen stattfindet. Selbst, wenn man an der Annahme Forel's festhält, dass die Kegelbildungen im Genfersee ihre Entstehung lateralen Wirbeln verdanken, muss man gerade aus diesem Grunde dem Unterstrom eine bedeutende Kraft zuschreiben, da Wirbelbewegungen nur bei grösseren Geschwindigkeiten entstehen können. Letzterer Grund ist jedoch nicht stichhaltig, da, wie wir später sehen werden, die Kegelbildungen auch anders erklärt werden können. Wenn Forel jedoch zugibt, dass auch im Rhonerinnsal die innere Böschung der Dämme eine grössere Neigung zeigt, so kann dies jedenfalls nur dann der Fall sein, wenn man dem Unterstrom die Fähigkeit zuschreibt, durch Fortschaffffung von Material die Neigung zu vergrössern, d. h. wenn man Erosion annimmt.

Die Verhältnisse im Genfersee sind daher wohl kaum darauf zurückzuführen, dass der Unterstrom eine geringere Geschwindigkeit besitzt, als vielmehr darauf, dass die Rhone vermutlich eine grössere Menge Schlamm führt als der Rhein, so dass die Erosion eine überaus langsame ist. Der an der Sohle durch Reibung niederfallende Sand hält der Erosion die Wage. Der grössere Schlammgehalt der Rhone lässt sich aus dem Umstand folgern, dass das Einzugsgebiet der Rhone mit einer Gesamtfläche von 5382 km² ein Gletscherareal von 1041 km² einschliesst, dasjenige des Rheins hingegen, welches sich über eine Fläche von 6564 km² ausdehnt, nur ein solches von 266 km².[26])

[26]) Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees. 1893. Zeppelin, Die geographischen Verhältnisse des Bodensees. p. 17.

Endlich sprechen die abwechselnden Neigungsverhältnisse des Rheinrinnsales, wie aus dem Längsprofil (Tafel Ia) ersichtlich, für Erosion, da sie auffallend der Gefällskurve eines in Erosion begriffenen Baches gleichen. Es geht daher aus dem Betrachteten hervor, dass ein Unterstrom, wie er im Bodensee und Genfersee vorhanden ist, jedenfalls in seinen oberen Teilen Erosionsfähigkeit besitzt.

b) Akkumulationsvermögen des Unterstromes.

Nach der Termrnantentheorie muss im unteren Teil der Rinnsale, wo die Neigung gering wird, Akkumulation stattfinden. Es ist leicht einzusehen, dass die Geschwindigkeit des Unterstromes bald abnehmen muss. Zunächst ist es die Reibung an dem in Ruhe befindlichen Seewasser, welche die Bewegung verzögert und an den Seiten die Ablagerung des Materials verursacht. Nach Forel findet dieselbe so statt, dass das Material durch Wirbel in die Tiefe geführt wird, wie dies nach seiner Ansicht die Kegelbildungen auf den Dämmen beweisen. Da man jedoch dieselbe Bildungsweise für die Dämme im Bodensee annehmen müsste, hier aber an keiner Stelle eine den Kegeln des Rhonerinnsales analoge Erscheinung vorhanden ist, so wird es fraglich, ob nicht vielmehr die Materialablagerung in der Form eines Schlammregens geschieht. Auch so lassen sich die Kegelbildungen erklären. Da in der Rhone die Schlammzufuhr eine stärkere zu sein scheint als im Rhein, so kann stellenweise eine vermehrte Akkumulation stattfinden, wie eine solche ja auch nach Forel's Ansicht über die Entstehung der Kegel angenommen werden muss. Lasse ich z. B. aus einem Gefäss, das ich in gerader Richtung bewege, Sand ausfliessen und zwar so, dass dies bald mehr, bald weniger geschieht, so entstehen an den Stellen vermehrter Akkumulation kegelförmige Erhöhungen. Die vermehrte Akkumulation lässt sich in Einklang bringen mit dem Umstand, dass die Kegelbildungen durchweg an der konvexen Seite der Windungen des Unterstromes liegen. Da das Wasser das Bestreben hat, seine geradlinige Richtung beizubehalten, so wird es an dem konvexen Ufer einen Anprall erleiden und den Damm zu unterwaschen suchen. Da der Unterstrom jedoch nicht, wie es bei Flüssen der Fall ist, auf den Raum innerhalb der Dämme beschränkt ist, sondern auch über dem Niveau derselben Bewegung zeigt, so werden die oberen Teile der Strömung über die konvexen Ufer hinausgehen, ihre Bewegung verlieren und ihren Schlamm absetzen. Da das Rinnsal im Bodensee keine Windungen zeigt in der Art, wie dasjenige im Genfersee, so erklärt sich hieraus das Fehlen von Kegelbildungen. Der grösste der Kegel im Genfersee liegt in 1250 m Entfernung von der Mündung. Es findet also schon hier bedeutende Akkumulation statt. Die an dem Scheitel der Strömung ihre Bewegung verlierenden Teilchen geraten jedoch, wenn sie sinken, wieder in die Strömung hinein und werden mit fortgerissen, so lange eine genügende Bewegung vorhanden ist.

Nun ist es aber nicht die Reibung an dem Seewasser allein, welche die Bewegung verringert. Die Geschwindigkeit wird ferner vermindert

durch den hydrostatischen Druck im See. Im Genfersee beträgt derselbe z. B. in einer Tiefe von 10.32 m 1 Atmosphäre, in der Tiefe von 206.49 m 20 Atmosphären und in der Tiefe von 309.64 m, der grössten Seetiefe, 30 Atmosphären. Wirkt dieser Druck einerseits direkt der Bewegung entgegen, so bedingt er andererseits im Verein mit der kälteren Tiefentemperatur, welche bei 309 m Tiefe + 5° C. beträgt, eine Vergrösserung der Dichte des Seewassers. Während also der Unterstrom durch Schlammabsatz seine Dichte verringert, vergrössert sich diejenige des Seewassers. Zwar wird die Dichte des Unterstromes langsamer abnehmen, da ja immer noch die gelösten Stoffe vorhanden sind. Endlich aber werden die notwendigen Bedingungen für den Unterstrom nicht mehr bestehen und das Wasser wird sich mit dem Seewasser vermischen. Die Stelle, an welcher der Dichtenausgleich erfolgt, an welcher also auch die Rinnsale ihr Ende erreichen, liegt in beiden Seen in ungefähr 200 m Tiefe. Es erübrigt noch kurz die Trichterbildung im Bodensee zu besprechen, die sich in der Entfernung von 7.5 km befindet. Da gleichzeitig an dieser Stelle das Rinnsal eine Umbiegung erfährt, so ist Zeppelin[27]) der Ansicht, dass sich der Unterstrom an einer entgegenstehenden Seehalde staut und eine Wirbelbewegung die trichterförmige Vertiefung aushöhlt. Da man jedoch dem Unterstrom in dieser Entfernung ein starkes Erosionsvermögen kaum mehr zuschreiben kann, so dürfte man eher annehmen, dass hier der Argen, welcher östlich von dieser Stelle mündet, durch einen Ausläufer seines Schwemmkegels das Rinnsal versperrt, den Unterstrom zum Aufstieg gezwungen und so eine Vertiefung durch Abdämmung verursacht hat.

Wir haben gesehen, dass der Unterstrom in seinen oberen Teilen Erosionsvermögen besitzt, dass aber in grösseren Tiefen Akkumulation stattfinden muss. Die Beweise für die Terminantheorie sind somit gegeben und lassen sich die Ergebnisse kurz folgendermassen zusammenfassen:

„Die unterseeischen Rinnsale in Genfersee und Bodensee werden bedingt durch die Verlängerung der Zuflüsse in dem Seebecken. Der Unterstrom wird ermöglicht durch die grössere Dichte der kalten und mit gelöstem und ungelöstem Schwebematerial beladenen Flüsse. Da der Unterstrom auf geneigter Fläche fliesst, so hat er das Bestreben, eine Normalgefällskurve herzustellen und daher neben lateraler Akkumulation, einer Folge der Reibung mit dem ruhenden Seewasser, in seinem oberen Teil sein Bett tiefer zu legen, in seinem unteren Teil dasselbe durch Ablagerung des Materials zu erhöhen."

[27]) Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees. B. XXII. Zeppelin, Die geographischen Verhältnisse des Bodensees. p. 81.

Schluss.

Fehlen von Rinnsalen in den übrigen Schweizer Seen.

In keinem der übrigen Schweizer Seen sind Rinnsale gefunden worden, obwohl die gleichen Verhältnisse vorzuliegen scheinen. Der Urnersee wurde durch Hörnlimann gerade daraufhin untersucht, der Brienzersee durch Jacky und Lindt 1886 einer Untersuchung unterworfen [28]), ohne dass auch nur die Spur einer Vertiefung gefunden wurde. Delebecque's hydrographische Aufnahmen der französischen Seen sind zu genau, als dass man annehmen könnte, dieses Phänomen sei ihm entgangen. Es scheint also, dass das Vorkommen thatsächlich auf Bodensee und Genfersee beschränkt ist, wenn nicht die Untersuchung kleinerer Alpenseen, welche ähnliche Verhältnisse aufweisen wie der Gurtschensee, eine Verallgemeinerung des merkwürdigen Phänomens gestattet. Eine definitive Erklärung für das Fehlen der Rinnsale in anderen Seen ist noch nicht gegeben. Forel glaubt dasselbe dadurch erklären zu können [29]), dass die Zuflüsse dieser Seen einen abweichenden Gehalt an Geschieben und Schwemmmaterial haben und dieser Annahme scheint die Thatsache zu entsprechen, dass der Rhein jährlich an Geschiebemengen nur 47 000 cbm in den Bodensee führt, die Reuss dagegen 150 000 cbm in den Urnersee. Delebecque ist der Ansicht [30]), dass die Ausnahmestellung von Rhein und Rhone durch den grösseren Gehalt ihrer Gewässer an Kalk und Magnesium in gelöstem Zustande und dadurch verursachter grösserer Dichte bedingt wird. Zeppelin endlich vermutet [31]), „dass die fraglichen Seen vermöge ihrer grösseren Nähe bei dem sie speisenden Gletschergebiet nie lange und anhaltend genug durchwärmt werden, um zu dem für die Bildung unterseeischer Rinnsale ausser und neben der Belastung der Flusswasser mit spezifisch schwereren Sinkstoffen unzweifelhaft auch nötigen dauernden Temperaturunterschiede zwischen ihrem Wasser und demjenigen ihrer Hauptzuflüsse zu gelangen."

Diese Vermutung trifft jedoch nicht zu; denn, wie Forel erwähnt [32]), ist auch im Brienzersee und in jedem See, in welchen Gletscherflüsse münden, das Phänomen der „Bataillère" bekannt, was auf die grössere Dichte der Zuflüsse hinweist. Man muss daher bis auf weiteres Forel's Annahme beipflichten. Die Untersuchung der Rinnsale ist noch nicht zur Genüge beendet, um eine endgültige Theorie aufstellen zu können.

Auch vorliegende Abhandlung soll nur ein Versuch sein, das Phänomen von einem neuen Gesichtspuntke aus zu betrachten.

[28]) Forel, Le Léman. I. p. 66.
[29]) Ebenda, p. 383. Anm.
[30]) Delebecque, Les lacs français. Paris 1898. p. 72.
[31]) Zeitschrift des Vereins für Geschichte des Bodensees. B. XXII. S. 82.
[32]) Forel, Le Léman. B. I. p. 388.

Lebenslauf.

Geboren zu Strassburg i/E. am 4. September 1878 als Sohn des Universitätsprofessors Dr. Albert Lücke besuchte ich daselbst das protestantische Gymnasium und erwarb im Sommer 1898 das Reifezeugniss.

Meine Liebe zur Natur liess mich das Studium der Naturwissenschaften ergreifen und wählte ich bald als Spezialfach die Geographie. Ich verbrachte zunächst drei Semester an der Kaiser-Wilhelms-Universität zu Strassburg i/E., ging zu Ostern 1900 an die Georgia Augusta zu Göttingen, woselbst ich ein Semester verblieb. Die nächsten vier Semester studierte ich an der kgl. Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin und kam endlich im Herbst 1902 an die kgl. Ludwig-Maximilians-Universität zu München.

Während dieser meiner Studienjahre besuchte ich die Vorlesungen und Uebungen folgender Herren Professoren:

Zu Strassburg:

Gerland, Hergesell, Braun, Fittig, Benecke, Bücking, Bruhns.

Zu Göttingen:

Hermann Wagner, v. Koenen, Liebisch, Ehlers, Riecke.

Zu Berlin:

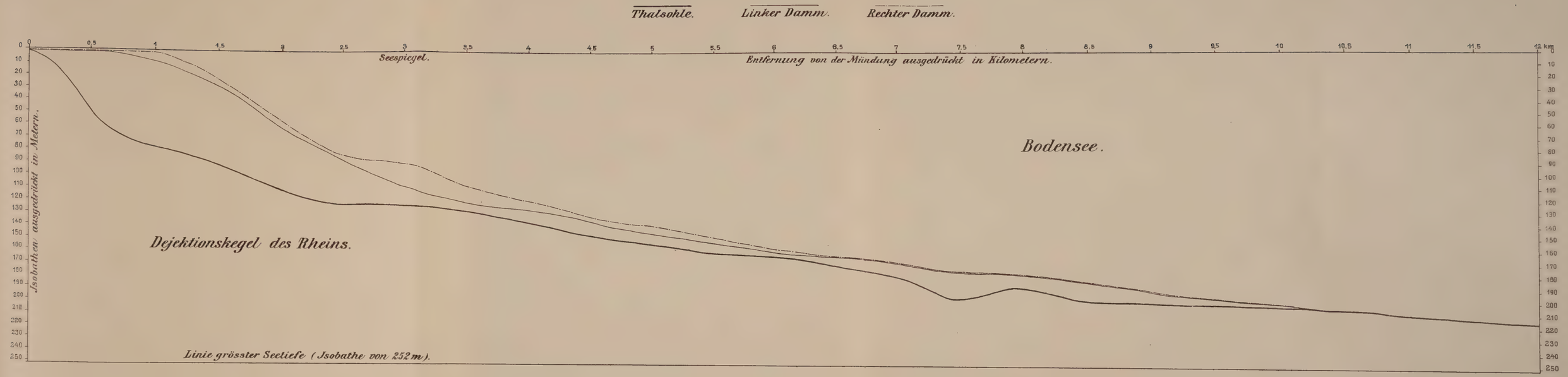
v. Richthofen, v. Drygalski, Weinstein, Schwarz, Knoblauch, Lehmann-Filhès, Wahnschaffe, Klein, Warburg.

Zu München:

Rotpletz, Oberhummer, Röntgen, Erk, Seeliger, Maas, Pompeky.

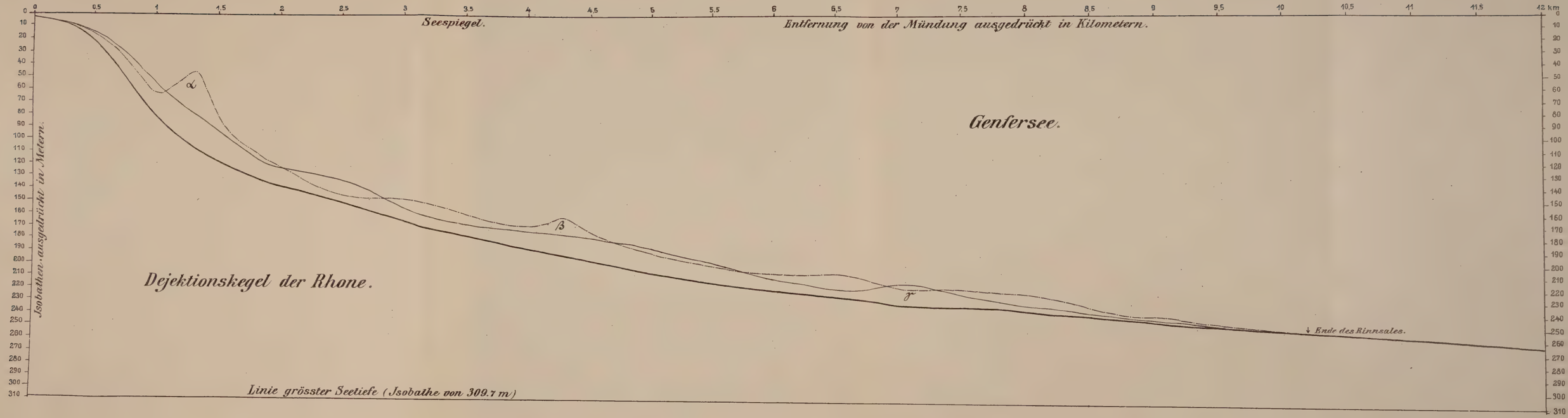
Allen diesen meinen hochverehrten Lehrern spreche ich hiermit meinen ergebensten Dank aus, vor Allem Herrn Prof. Dr. Rotpletz, sowie Herrn Prof. Dr. Gerland, die mir in liebenswürdigster Weise die reichste Belehrung und Anregung zu Teil werden liessen.

Tafel I[a] Das sublakustre Thal im Bodensee.

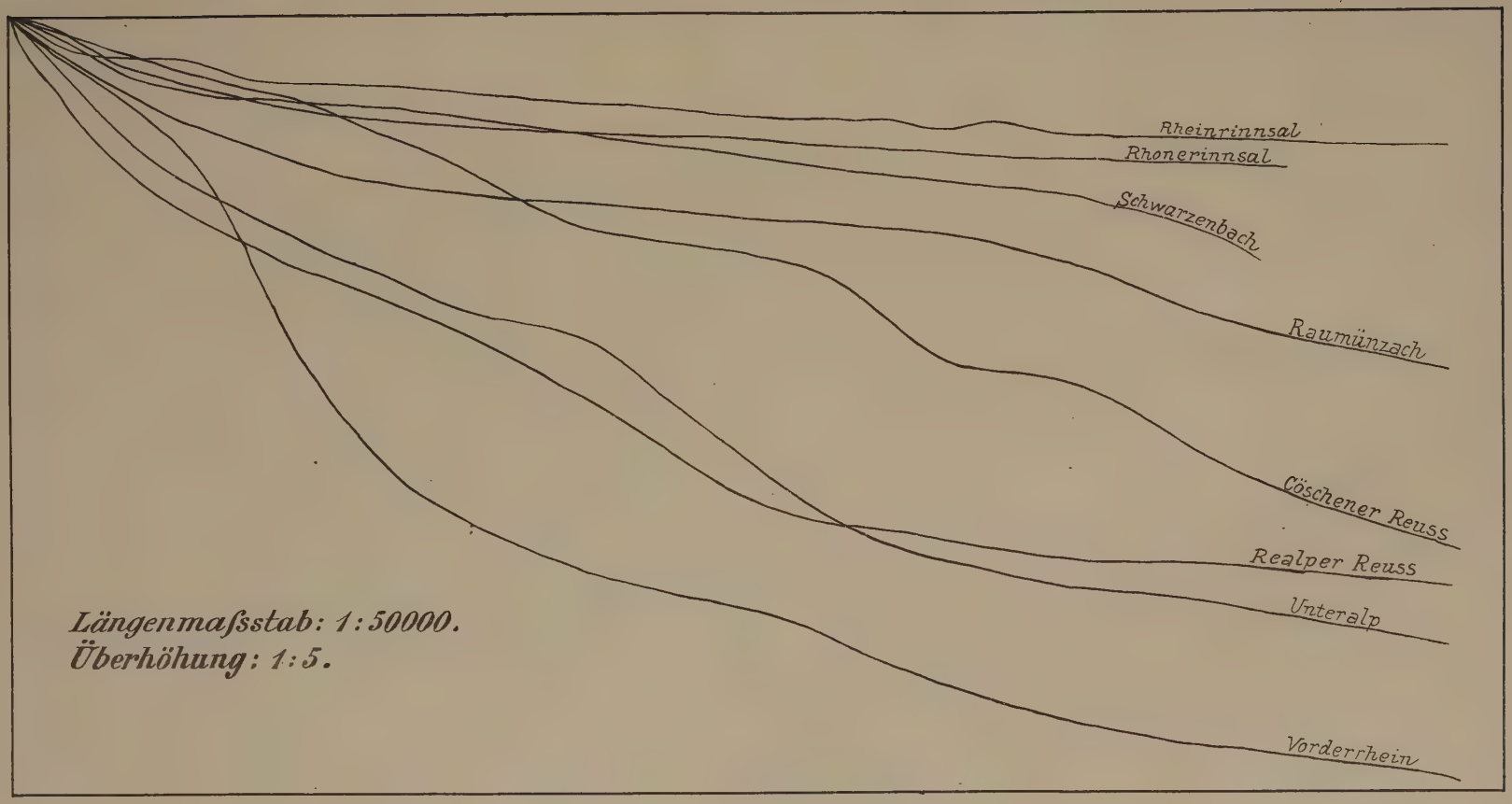


Tafel I[b] Das sublakustre Thal im Genfersee.

Thalsohle. *Linker Damm.* *Rechter Damm.*



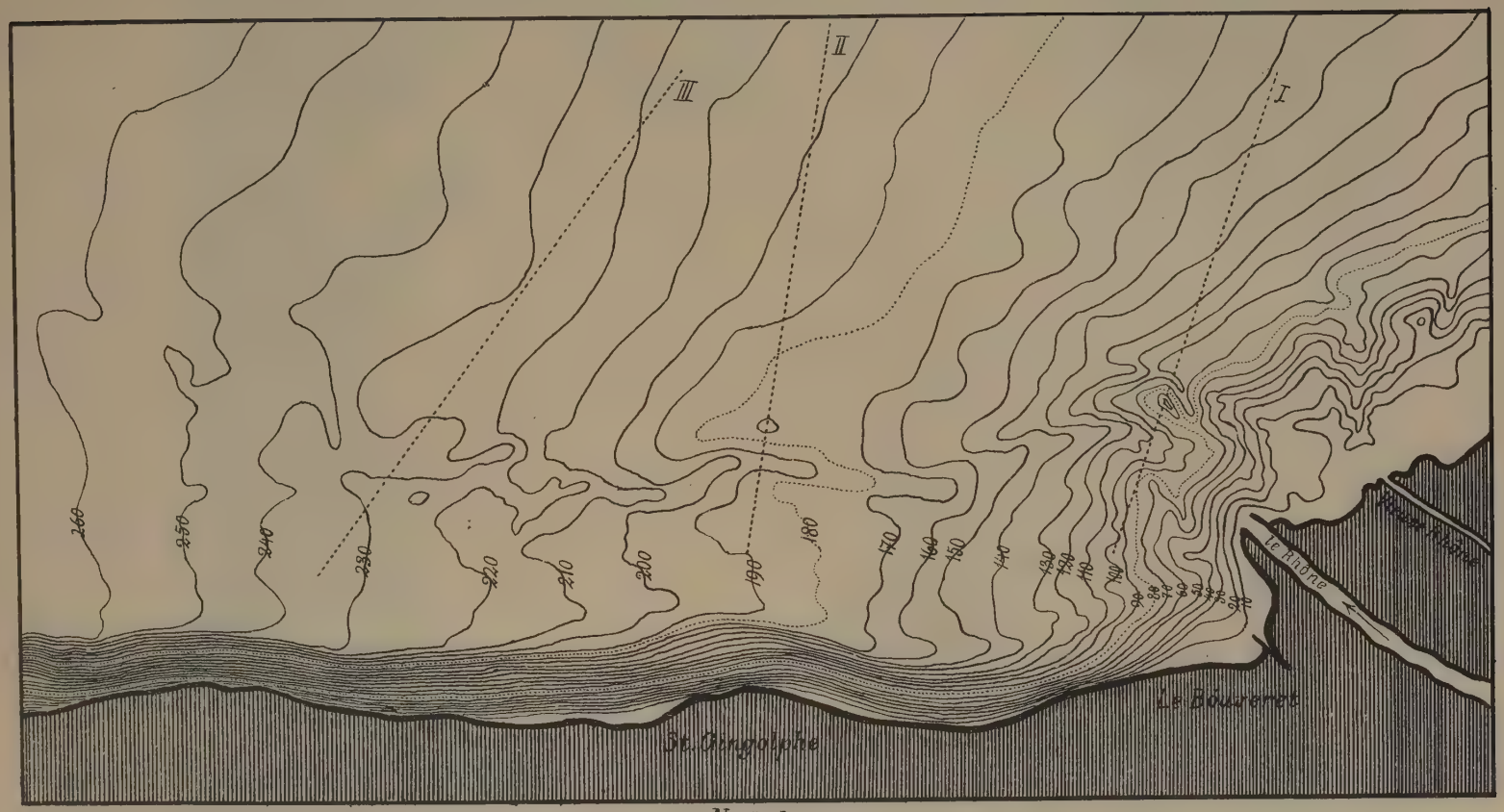
Tafel II.



Die sublakustren Rinnsale in Bodensee und Genfersee
im Vergleiche mit
Hochgebirgs - und Mittelgebirgsbächen.

Karte II.

Das Rinnsal im Genfersee.

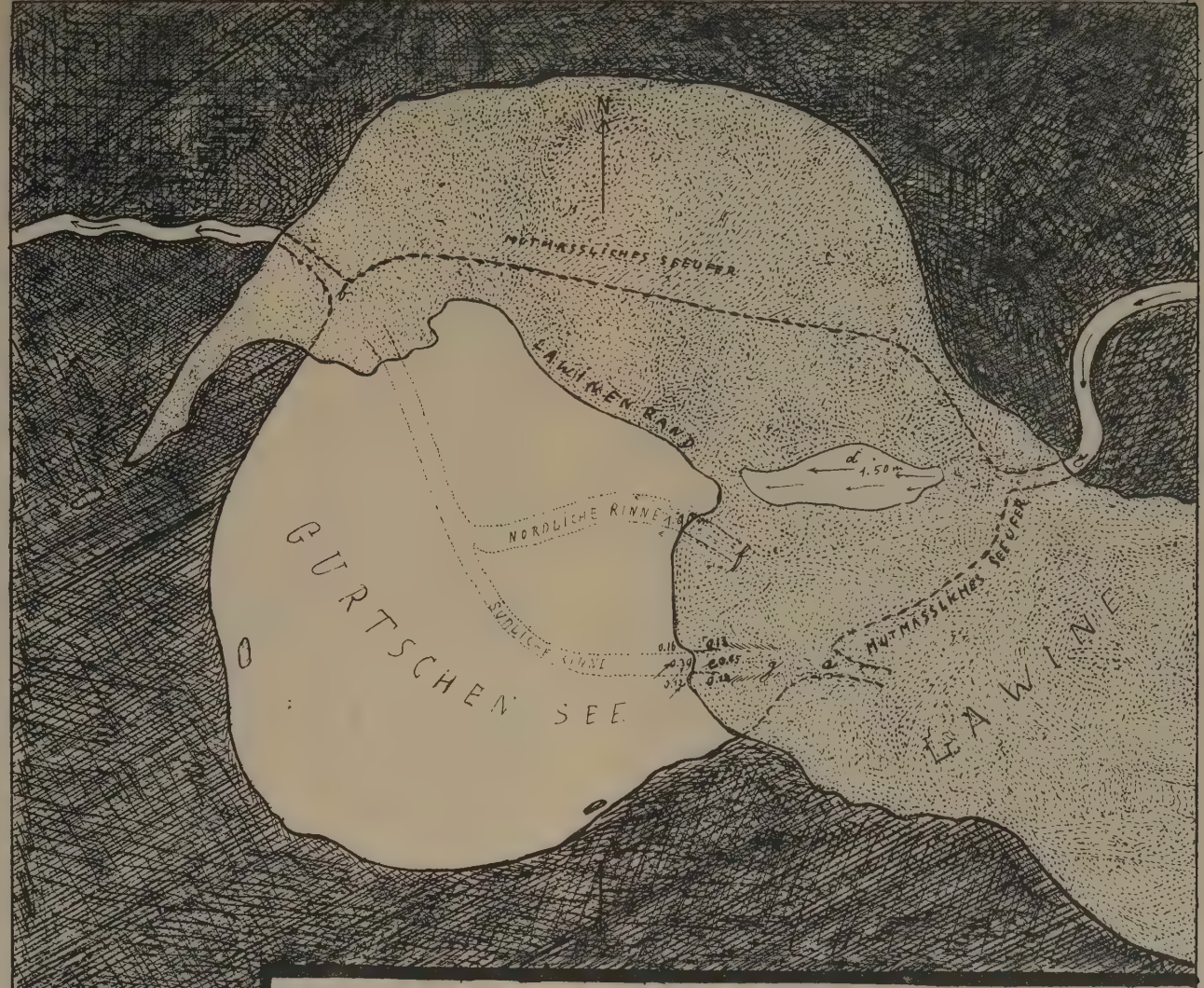


Nach der

CARTE des SONDAGES du LAC LÉMAN

Maßstab: 1:50000.

I, II, III, siehe die Profile Fig. IV.



Maßstab : 1 : 500.

0 5 10 15

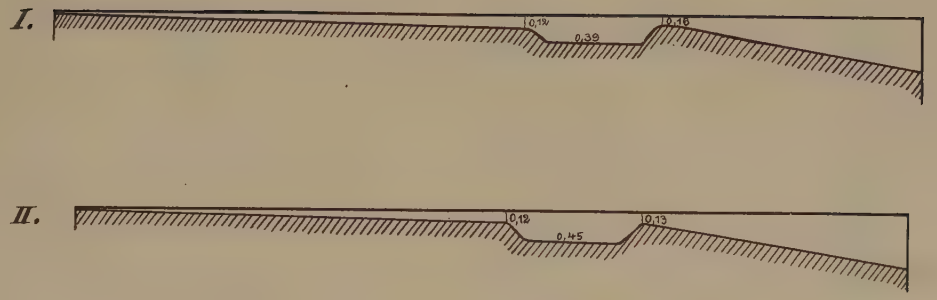
OBERFLÄCHEN STRÖMUNG. UNTERSTROM.

Die Rinnen im Gurtschensee i.J. 1903. (August)

Fig. 5. Wildbäche bei Kandersteg.

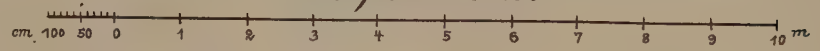
Fig. 1. Gurtschensee bei Andermatt. 1901.

Fig. II.



Die südliche Rinne im Gurtschensee.

Maaßstab: 1:100



I. Profil: 0,50 m vom Lawinenrand entfernt im See.
II. Profil: 1,50 m vom Lawinenrand entfernt unter der Lawine.

Fig. III. Querprofile durch das Rheinrinnsal.

Maßstab: 1:10000.

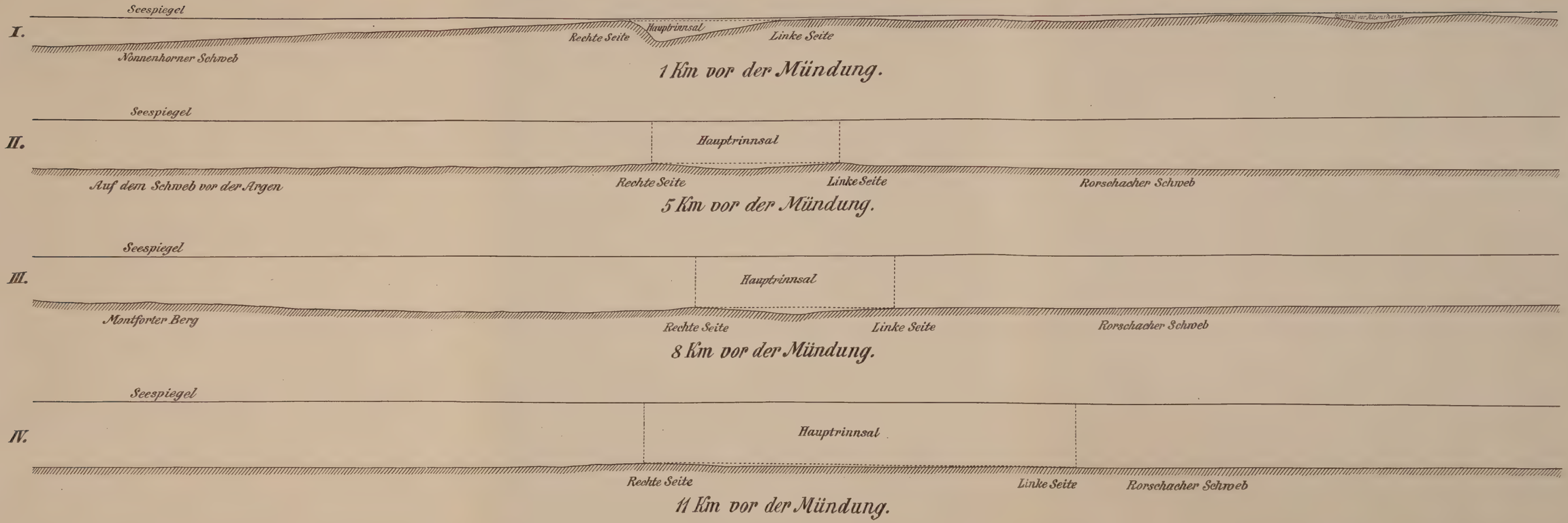
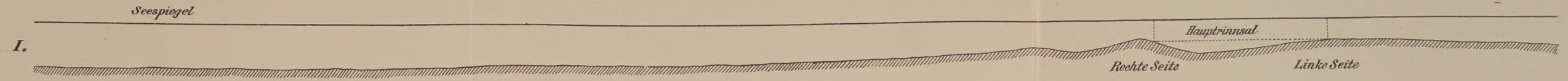
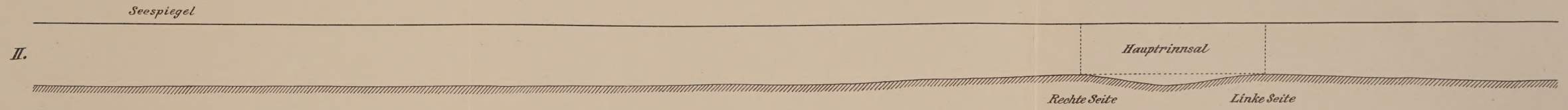


Fig. IV. Querprofile durch das Rhonerinnsal.

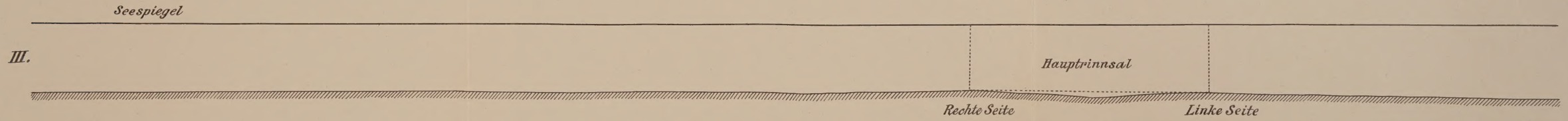
Maßstab: 1:10000.



1 Km vor der Mündung.



4,5 Km vor der Mündung.



8 Km vor der Mündung.